

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO PAULO MENDES LEITE

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁCIDO FÍTICO DE FARELO DE TRIGO POR
ULTRASSOM**

MEDIANEIRA

2025

PEDRO PAULO MENDES LEITE

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁCIDO FÍTICO DE FARELO DE TRIGO POR
ULTRASSOM**

Optimization of phytic acid extraction from what ban by ultrasound

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Alimentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Ilton José Baraldi.

Coorientadora: Profa. Dra. Cristiane Canan.

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

PEDRO PAULO MENDES LEITE

**OTIMIZAÇÃO DA EXTRAÇÃO DE ÁCIDO FÍTICO DE FARELO DE TRIGO POR
ULTRASSOM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
como requisito para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia de Alimentos, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26 de novembro de 2025

Prof. Dr. Ilton José Baraldi
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profa. Dra. Eliane Colla
Doutorado em Engenharia de Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profa. Dra. Carolina Castilho Garcia
Doutorado em Ciências dos Alimentos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

RESUMO

O farelo de trigo (FT) é um subproduto abundante e rico em compostos bioativos de interesse industrial, como o ácido fítico (AF), que tem despertado atenção nas áreas de saúde, meio ambiente, síntese de nanomateriais e nas indústrias de alimentos, indústrias químicas e farmacêuticas. Neste estudo, buscou-se maximizar a extração de AF a partir do FT por meio de extração assistida por ultrassom utilizando HCl como solvente. A influência da concentração de H^+ e do tempo de extração foi investigada por Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) e modelada por Metodologia de Superfície de Resposta (MSR). O modelo ajustado apresentou alta predição ($R^2 = 0,909$) e indicou como condição ótima $1,45 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de H^+ e 14 minutos, resultando em $3230 \pm 77 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de AF e rendimento de 6,46%. Esse valor situa-se no limite acima dos teores reportados para o FT, demonstrando uma maior eficiência do processo. O método proposto mostrou-se tecnicamente viável e representa uma alternativa para a valorização de subprodutos da indústria de grãos.

Palavras-chave: Extração sólido-líquido; Farelo de trigo; Ácido fítico; Íons metálicos; subprodutos

ABSTRACT

Wheat bran (WB) is an abundant by-product rich in bioactive compounds of industrial interest, such as phytic acid (PA), which has attracted attention in the fields of health, environmental applications, nanomaterial synthesis, and the food, chemical, and pharmaceutical industries. In this study, the extraction of PA from WB was optimized using ultrasound-assisted extraction with HCl as the solvent. The effects of H⁺ concentration and extraction time were evaluated through a Central Composite Rotational Design (CCRD) and modeled using Response Surface Methodology (RSM). The adjusted model exhibited high predictive capacity ($R^2 = 0.909$) and indicated an optimal condition of $1.45 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}^+$ and 14 minutes, resulting in a PA concentration of $3230 \pm 77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and a yield of 6.46%. This value lies at the upper limit of the ranges reported for WB, demonstrating the high efficiency of the process. The proposed method proved technically feasible and represents an alternative for adding value to by-products of the grain industry.

Keywords: Solid-liquid extraction; Wheat bran; Phytic acid; Metal ions, by-products.

Dedico este trabalho a mim mesmo — fruto das minhas quedas, esforços e renascimentos —, aos professores que iluminaram minha trajetória acadêmica e aos amigos e familiares que já não estão mais aqui, mas permanecem como combustível silencioso, inspirando cada passo e cada conquista.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Prof. Dr. Ilton José Baraldi e Prof.^a Dr.^a Cristiane Canan, pela paciência, pela sabedoria compartilhada e pela confiança depositada em mim ao longo deste percurso.

Ao NUAPE do campus, meu agradecimento especial. No início da jornada, seu apoio foi fundamental para que o caminho pudesse existir.

Aos amigos, agradeço pelo apoio, pelo riso, pelo abrigo e por se tornarem a família que a vida me presenteou.

Aos que partiram antes de verem este momento — minha tia Valdely, tia Elisa, mãezinha Leda e vô Pedro —, minha eterna gratidão. Vocês foram mães e pais em diferentes formas, e mesmo ausentes, continuam presentes em cada conquista que carrego.

Por fim, ao meu finado pai — não pelo exemplo a ser seguido, mas justamente por ter sido o exemplo do que eu jamais quis me tornar. Agradeço por mostrar, ainda que de forma amarga, o que significa crescer sem guia e tornar-se, apesar disso, o meu próprio norte.

Sonhamos com o amanhã, mas ele nunca chega
Ansiamos por uma glória que nem ao certo desejamos
Esperamos o novo dia, sem perceber que ele já está aqui
Rezamos por um salvador, quando a salvação está em nossas próprias mãos
E, ainda assim, continuamos a dormir.
(SOCIEDADE DOS POETAS MORTOS, 1989)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Molécula do Ácido Fítico.....	15
Figura 2 – Produção mundial dos principais cereais.....	16
Figura 3 – Evolução de moagem do trigo no Brasil.....	17
Figura 4 – Volume total de moagem com base em 95 plantas moageiras	17
Figura 5 – Principais divisões morfológicas do grão de trigo	18
Figura 6 – Curva de calibração para quantificação de AF	27
Figura 7 – Superfície de resposta para a concentração de ácido fítico extraído em função da concentração do solvente e tempo de ultrassom	30
Figura 8 – Superfície de contorno para a concentração de ácido fítico extraído em função da concentração do solvente e tempo de ultrassom	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos experimentais do delineamento utilizados na extração	23
Tabela 2 - Composição centesimal do farelo de trigo.....	26
Tabela 3 - Absorbância e concentração de ácido fítico (AF) nas amostras experimentais	27
Tabela 4 - Resultados do planejamento experimental (DCCR) para a extração de ácido fítico	28
Tabela 5 - Coeficientes e significância dos efeitos das variáveis sobre a [AF]	28
Tabela 6 - Análise de variância (ANOVA) para a concentração de AF obtida na extração.....	29
Tabela 7 - Métodos de extração e determinação de ácido fítico em farelo de trigo reportados na literatura	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Gerais	14
2.1 Específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 O ácido Fítico.....	15
3.2 Trigo e aspectos econômicos.....	16
3.3 Extração do ácido fítico.....	18
3.4 Ultrassom.....	19
3.5 Aplicações do ácido fítico.....	20
4 MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1 Matéria prima	22
4.2 Composição centesimal	22
4.3 Planejamento dos experimentos	22
4.4 Quantificação de AF pelo reagente WADE.....	23
4.5 Extração de AF assistida por ultrassom	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1 Análise centesimal do farelo de trigo	26
5.2 Extração de ácido fítico no farelo de trigo	26
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
6.1 Conclusão	33
6.2 Sugestões para trabalhos futuro.....	33
REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

Os subprodutos agroindustriais têm despertado interesse devido ao seu potencial para geração de ingredientes e compostos de valor agregado. Esse movimento se intensifica diante da busca por processos mais sustentáveis, pela redução de resíduos e pela necessidade de aproveitar de forma eficiente materiais tradicionalmente negligenciados pelas cadeias produtivas. No setor de grãos, um dos subprodutos mais relevantes é o farelo de trigo (FT), produzido em larga escala durante o beneficiamento do trigo. Além de sua ampla disponibilidade, o FT apresenta composição rica em fibras, minerais e diversos compostos bioativos.

O ácido fítico (AF), mio-inositol hexafosfato (InsP6), é um composto que tem recebido considerável atenção devido à sua estrutura química característica, lhe proporcionando um elevado potencial para formação de complexos com íons metálicos, como zinco, ferro, cálcio. Essa afinidade se deve aos seis grupos fosfatos (PO_4^{3-}) ligados ao anel de inositol, com a capacidade de doar até 12 prótons ionizáveis (Costello; Glonek; Myers, 1976). Naturalmente encontrado em cereais, sementes, oleaginosas e legumes, o fósforo total presente representa entre a 60 a 90% em sementes, caracterizando como principal forma de armazenamento do AF nos tecidos vegetais (Quirrenbach; Kanumfre; Rosso; Filho, 2009).

Dado seu perfil estrutural altamente reativo e sua composição rica em grupos fosfato, o ácido fítico tem despertado crescente interesse científico e tecnológico em diferentes áreas do conhecimento. Na indústria de alimentos, por exemplo, é estudado por suas propriedades antioxidantes e antimicrobianas; no setor ambiental e químico, por sua capacidade de atuar na detecção e remoção de metais pesados; em nanotecnologia, como componente de materiais funcionais; e, na área médica, como potencial modulador do crescimento de células cancerígenas (Wang *et al.*, 2025).

A maioria dos métodos de extração e quantificação do AF fundamenta-se na formação de complexos insolúveis com íons de ferro em um meio ácido (Nappi *et al.*, 2006). A solubilidade do ácido fítico é sensível ao pH, sendo pronunciadamente solúvel em soluções com pH abaixo de 2 (Champagne *et al.*, 1985). Amplamente empregado no processamento, preservação e extração de diversos compostos, o

ultrassom é uma tecnologia cuja aplicação varia conforme a frequência e a intensidade das ondas utilizadas. Essas ondas são capazes de romper ligações intermoleculares, promovendo o fenômeno de cavitação, contribuindo para o rompimento das paredes celulares seguida pela liberação do seu conteúdo e/ou alterando propriedades físico-químicas do meio, podendo favorecer reações químicas (Patist; Bates, 2008; Vinatoru, 2001). O emprego de ultrassom na extração de ácido fítico de diferentes fontes de origem vegetal reduz significativamente o tempo requerido para extração (Lehrfeld, 1989).

No Brasil, o trigo é cultivado principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Durante o processamento do grão para a produção de farinha, gera-se o farelo, subproduto da etapa de moagem. Tradicionalmente, esse material tem sido destinado à produção de adubo, ração animal ou à produção de energia por combustão. O AF presente nesse resíduo corresponde a 5,38% em base seca, o que o torna um subproduto de interesse para diferentes aplicações (Lehrfeld, 1989). No atual contexto de transição para modelos mais sustentáveis, pautados pela bioeconomia e pela economia circular, a valorização de resíduos agroindustriais como o farelo de trigo (FT) ganha destaque, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de tecnologias mais limpas.

Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é otimizar a extração de ácido fítico a partir do farelo de trigo, avaliando a influência da concentração do solvente HCl e do tempo de extração no ultrassom e determinando as condições operacionais que maximizem o rendimento do composto.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Otimizar o processo de extração do ácido fítico de farelo de trigo, avaliando a influência de diferentes concentrações do solvente HCL e do tempo de exposição no ultrassom.

2.2 Objetivos Específicos

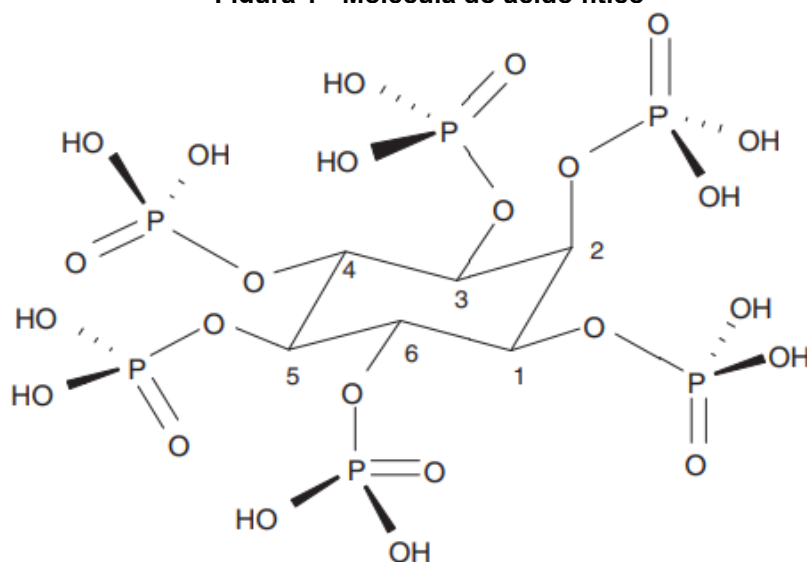
- Determinar a composição química do farelo de trigo;
- Avaliar o efeito das variáveis concentração de HCl e do tempo de ultrassom sobre a extração de ácido fítico pela aplicação de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR);
- Comparar os resultados obtidos com valores reportados na literatura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O ácido Fítico

O ácido fítico (AF), ou mio-inositol-1,2,3,4,5,6-hexafosfato é um composto cíclico com seis átomos de carbono ligados a seis grupos fosfato (Figura 1) (Shamsuddin, 2002). Esse composto apresenta um excelente potencial quelante devido à sua estrutura e afinidade pelos íons metálicos, formando fitatos insolúveis em água quando ligados. Aproximadamente 1% a 5% do peso de diversas sementes, cereais, nozes e pólen corresponde a AF (Graf; Eaton, 1990).

Figura 1 - Molécula do ácido fítico



Fonte: (FUSTER, 2016)

Estudos têm quantificado o teor de AF em diferentes tipos de alimentos, em sua maioria encontrados em maiores teores em grãos e cereais. Frutas e hortaliças estão entre os alimentos com menores teores de ácido fítico, possuindo média de 0,05 % para abacate e 0,14 % para manga (Fergusson *et al.*, 1988), teores médios entre 0,017 e 0,036 % para banana (Lazarte *et al.*, 2015). Para batata, os teores ficaram entre 0,035-0,073% (Phillippy *et al.*, 2003) e para cenoura os valores encontraram-se entre 0,015-0,09% do conteúdo de ácido fítico em base seca (Frossard *et al.*, 2000).

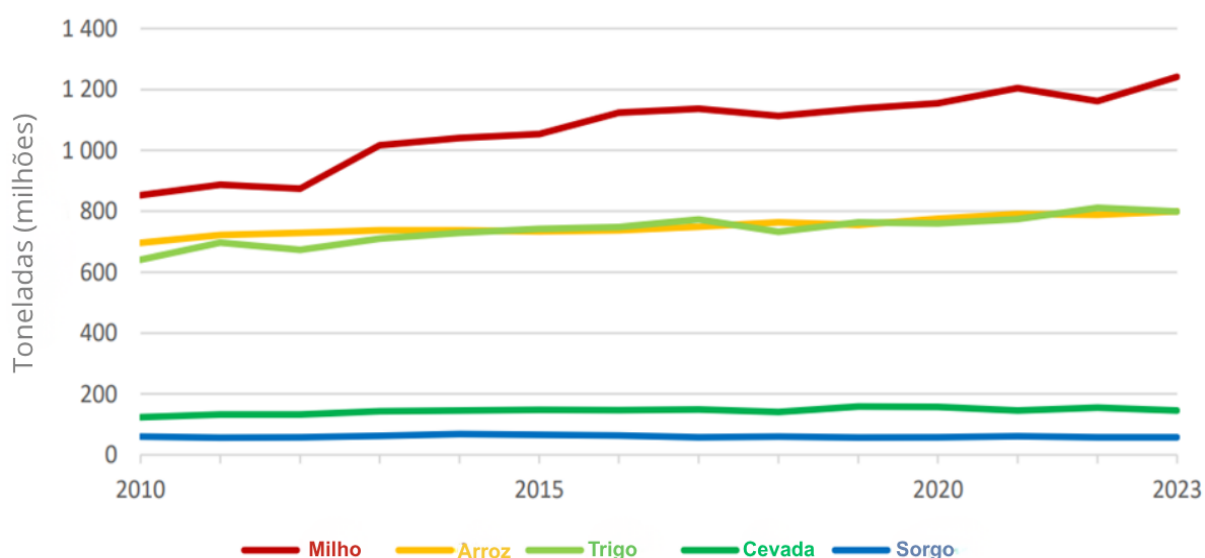
Cereais fracionados exibiram teores maiores de AF quando comparado a outros alimentos, destacando-se o farelo de arroz (entre 5,90% e 6,48% de conteúdo de AF em base seca) (Canan *et al.*, 2011). No FT o teor de AF a 5,38%, mostrando-se uma fonte alternativa para estudos que envolvem a extração do AF (Lehrfeld, 1989).

3.2 Trigo e aspectos econômicos

A gramínea trigo, pertencente ao gênero *triticum*, compreende diversas subespécies, sendo *Triticum aestivum* responsável por cerca de 90% da produção mundial, abrangendo uma variedade de classes de trigo, como os extraduros, duros, moles e semiduros, os quais são processados conforme demanda industrial (ABITRIGO – Associação Brasileira da Indústria do Trigo, 2025).

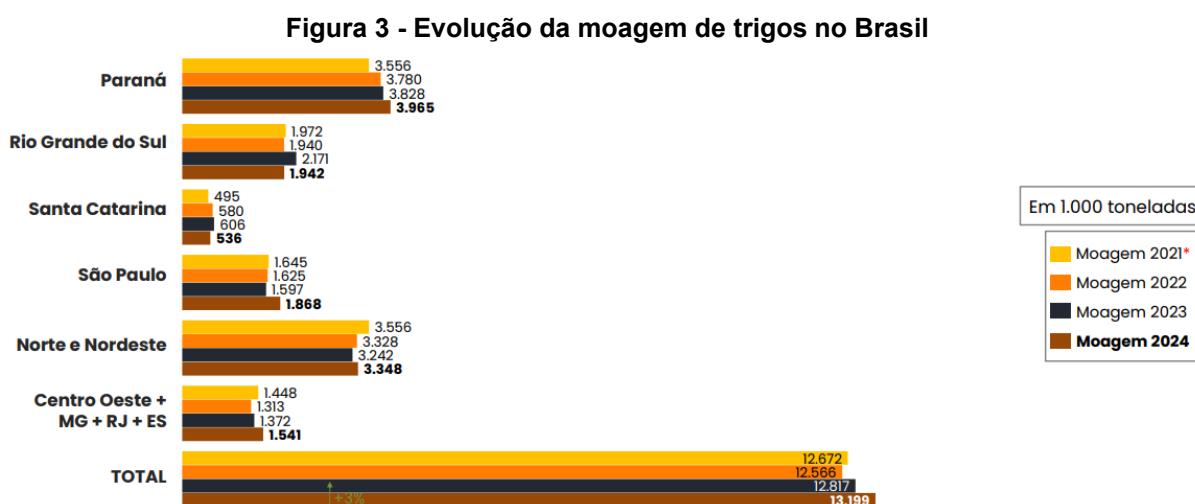
De acordo com a publicação Agricultural production statistics 2010-2023, da FAO (Food and Agriculture Organization) de 2024, o trigo é o segundo cereal mais produzido no mundo, atrás do milho. Em 2023, entretanto, ocupou a terceira posição, com uma produção global estimada de 799 milhões de toneladas, abaixo do arroz, que atingiu 800 milhões de toneladas. A publicação ainda destaca o crescimento do trigo de 25 % desde 2010, superando o arroz no mesmo período (FIGURA 2).

Figura 2 - Produção mundial dos principais cereais



Fonte: (Adaptado de FAO, 2024)

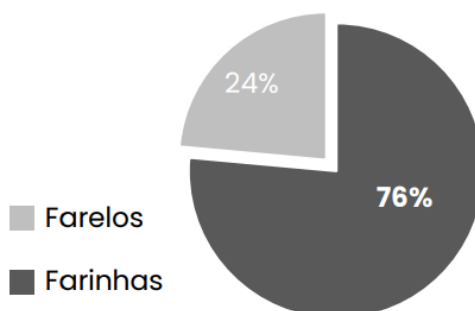
No cenário nacional, o trigo é cultivado majoritariamente nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Em 2024, segundo levantamento da ABITRIGO publicado em 2025, a cadeia de moagem brasileira registrou um volume total de 13,2 milhões de toneladas de trigo processadas, um aumento de 3% em relação ao ano de 2023 (FIGURA 3). O Paraná foi o estado de maior processamento do cereal, com 30% de toda moagem nacional, seguido do Rio Grande do Sul (15%) e São Paulo (14%). Embora o Norte e o Nordeste do Brasil não sejam regiões produtoras de trigo devido às limitações climáticas, ambas registram volumes expressivos de moagem, devido a dependência de trigo importado, representando 99,2% do volume moído nessas localidades (ABITRIGO, 2025).



Fonte: (ABITRIGO, 2025)

Ainda conforme com o relatório da ABITRIGO (2025), o volume total de moagem registrado por 95 plantas de produção é de 10.089.634 t. Desse volume, 76% (7.711.227 t) foram destinados para farinhas. O restante, que corresponde a 24% do total, é composto pelo FT, totalizando 2.378.407 t (FIGURA 4).

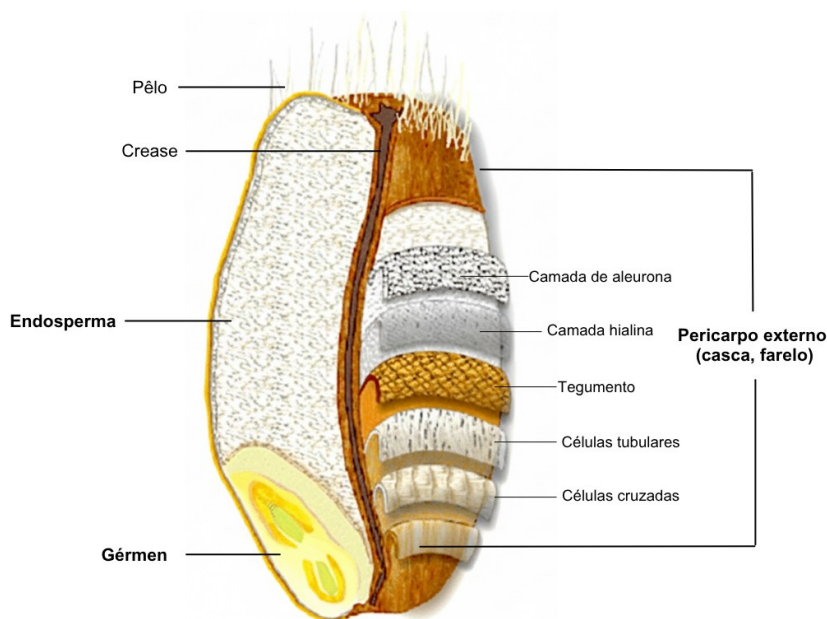
Figura 4 - Volume total de moagem com base em 95 plantas moageiras



Fonte: (ABITRIGO, 2025)

O farelo de trigo (FT) é caracterizado como a parte do grão de trigo que não é utilizada para a produção de farinha, ou seja, derivado do pericarpo (casca) (FIGURA 5). Mesmo sendo utilizado como adubo, ração animal e fonte de energia por combustão, o FT ainda é considerado resíduo pela maioria das indústrias, tornando-se necessária a busca por alternativas viáveis para o aproveitamento desse subproduto.

Figura 5 – Principais divisões morfológicas do grão de trigo



Fonte: (Adaptado de Heinze, 2017)

3.3 Extração do ácido fítico

A extração do AF consiste na solubilização do fitato e sua posterior dissociação ácida a partir da matriz original, podendo estar ligado a proteínas ou presente na forma de um sal misto (Saad *et al.*, 2011). Em um estudo que investigou a solubilidade de diferentes minerais, proteínas e AF no farelo de arroz, observou-se que o perfil de solubilidade do fósforo fítico foi influenciado pelo pH. Ao reduzir o pH de 6,2 para 5,0, ocorreu um aumento da solubilidade, atingindo um valor mínimo em torno de pH 2,0. Posteriormente, a solubilidade aumentou rapidamente em valores de pH mais baixos (Champagne *et al.*, 1985). Esse aumento da solubilidade do AF no farelo de arroz, em pH abaixo de 2,0, é atribuído ao deslocamento completo do ácido fítico das moléculas de proteína pela ação dos íons cloreto do ácido clorídrico (Fontaine *et al.*, 1946).

Com base na solubilidade do fitato em meio ácido, diferentes condições de extração do AF foram exploradas ao longo das últimas décadas. Estudos demonstraram que, para feijões maduros e imaturos, a extração com solução de HCl a $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ apresenta melhor desempenho em comparação com o ácido perclórico na mesma concentração (Makower, 1970). Ainda, foi avaliado o efeito do volume de solvente, não sendo observadas diferenças significativas na quantidade extraída ao variar-se o volume de HCl a $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de 5 para 20 mL, sob agitação a 20°C por 3 horas (Carlsson *et al.*, 2001). Em contrapartida, outros autores adotaram condições mais concentradas, como o uso de HCl a $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, mantendo temperatura ambiente e agitação por 3 horas (Carneiro *et al.*, 2002). Em farelo de arroz, o emprego de HCl a $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ e razão sólido/líquido de $0,1 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ resultou na extração máxima de AF após 1 hora sob agitação a 25°C (Canan *et al.*, 2011). Ainda foi incorporada a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM) para otimização do processo de extração do AF no farelo de amendoim, cujas condições ideais foram definidas em $0,02 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ de HCl, 30°C , 105 minutos sob banho em ultrassom e relação S/L de 1:16, com rendimento de 6,1% (Hong *et al.*, 2017). O uso de ácido acético como solvente de extração de AF em farelo de arroz resultou em rendimento de 4,05% a 43°C , pH 2,99 e relação S/L de 9:1 (Chen *et al.*, 2025).

3.4 Ultrassom

Na indústria de alimentos, têm sido exploradas novas tecnologias com o objetivo de otimizar o tempo de processamento, reduzir custos e aprimorar as condições de produção (Cárcel *et al.*, 2012). O ultrassom é uma dessas tecnologias, com aplicação no processamento e extração de compostos bioativos, entre outras finalidades (Chemat *et al.*, 2011). Equipamentos operados com alta potência geram ondas ultrassônicas, desencadeando o fenômeno de cavitação, responsável por muitos dos efeitos observados em alimentos sujeitos a esse tratamento (Knorr *et al.*, 2011; Lorimer; Mason, 1987).

A cavitação ocorre devido à ação do ultrassom em fluidos contínuos, gerando pressões locais abaixo da pressão de vapor do líquido sob ondas ultrassônicas (Patist; Bates, 2008). Nessas regiões de variação de pressão, formam-se bolhas de gás que crescem durante a fase de rarefação e diminuem durante a

compressão. No ciclo de compressão, o colapso das bolhas libera intensa energia, elevando localmente a temperatura (cerca de 5500°C) e a pressão (50Mpa), promovendo alto cisalhamento e turbulência que favorecem processos como a extração de compostos (Soria; Villamiel, 2010).

A combinação entre a ação do solvente sob aquecimento e/ou agitação é uma abordagem clássica para a extração de compostos orgânicos de plantas ou sementes. Ainda, a técnica pode ser aprimorada com o uso de ultrassom de alta potência, permitindo uma penetração eficaz do solvente no material celular (Patist; Bates, 2008; Vinatoru, 2001).

Lehrfeld (1989), ao estudar a extração de AF de grãos e leguminosas, submeteu amostras de 0,5 a 0,05 g a 10 mL de solução de HCl 0,5 mol·L⁻¹ utilizando sonicação direta com microprobe. O tratamento ultrassônico reduziu significativamente o tempo necessário para a extração, de cerca de 2 horas para apenas 1 a 3 minutos, mantendo alta eficiência de solubilização. O uso do ultrassom portanto tem se consolidado como técnica de intensificação de processos extrativos, com estudos recentes relatando aumentos de até 40% no rendimento de compostos bioativos, como açúcares, ácidos orgânicos e fenólicos, em comparação à extração convencional (Nemes *et al.*, 2025).

3.5 Aplicações do ácido fítico

Diversas pesquisas têm explorado os efeitos do AF em várias condições de saúde, o que se deve em grande parte à sua capacidade de quelar minerais (Sathe; Reddy, 2002). Em estudo em camundongos com fibrossarcoma induzido, o AF reduziu metástases pulmonares, prolongou a sobrevivência e diminuiu o crescimento de tumores subcutâneos (Vucenik *et al.*, 1992). Em camundongos diabéticos, o AF promoveu significativa redução nos níveis de glicose sanguínea em jejum (Lee *et al.*, 2006). Kim *et al.* (2010) também observaram níveis de glicose mais baixos em camundongos alimentados com dietas ricas em gorduras contendo farelo de arroz.

Se estendendo no desenvolvimento tecnológico para aumento da vida de prateleira de alimentos devido a sua capacidade antioxidante, o AF é capaz de ocupar os seis sítios de coordenação do metal. Ao formar um quelato inativo, ele inibe a produção de radicais hidroxila e altera o estado de oxidação de Fe²⁺ para Fe³⁺ (Graf; Eaton, 1990). O Fe³⁺ resultante é inerte, ao passo que o Fe²⁺ é um

agente catalítico de peroxidação lipídica e geração de oxirradicais (Graf *et al.*, 1987). Essa ocupação completa dos sítios impede a reação entre o peróxido de hidrogênio e o íon ferroso quelado, prevenindo a formação de radicais hidroxila mediada pelo ferro (Graf *et al.*, 1984).

O AF também demonstrou comportamento antimicrobiano, exibindo efeitos inibitórios similares aos do sorbato de sódio contra *Clostridium perfringens* (Bloot, 2017). Além disso, Xu *et al.*, (2025) demonstraram que o composto é capaz de inibir a reação de Maillard, ao interagir com açúcares redutores como a glicose, reduzindo a formação de compostos de escurecimento e preservando propriedades antioxidantes nos alimentos. O AF aumentou a estabilidade oxidativa e estrutural da emulsão de *Pickering* por mais de 50 dias. A combinação de ácido fítico (0,01%) com proteínas do farelo de arroz demonstrou potencial funcional em sistemas emulsificados, atribuídos à interação do AF com as proteínas estruturais em estudos com óleo de semente de *Acer truncatum* Bunge (Huang *et al.*, 2025).

Estudos ainda destacam o potencial tecnológico do ácido fítico em sistemas de filtração, como demonstrado por Li *et al.* (2025), que o utilizaram na funcionalização de estruturas metal-orgânicas para produção de membranas de nanofiltração. A incorporação do composto promoveu maior hidrofiliabilidade, seletividade iônica e permeabilidade. Ji *et al.* (2017) empregaram o ácido fítico como agente estabilizante na síntese de um nanocompósito superanfílico baseado em óxido de ferro magnético e óxido de grafeno ($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-GO}$) para a extração seletiva de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH's) em óleos vegetais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Matéria prima

O farelo de trigo foi fornecido pelo Moinho Itaipu (Santa Terezinha do Itaipu – PR), com a informação de que 22% do grão de trigo industrializado, foi transformado em farelo durante o processo de produção da farinha.

4.2 Composição centesimal

O teor de umidade das amostras foi determinado conforme o método nº 012/IV, descrito pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (IAL, 2005), utilizando secagem em estufa a 105°C até peso constante.

O teor de proteínas do farelo de trigo foi determinado pelo método Kjeldahl, conforme metodologia descrita pela AOAC (2011). Para o cálculo do teor proteico, foi utilizado o fator de conversão f de 5,83.

O teor de lipídeo foi mensurado através da extração com hexano pelo método de Soxhlet referenciado pelo INSTITUTO ADOLFO LUTZ (2005). Os extratos contendo o óleo foram quantificados gravimetricamente após a evaporação do solvente.

O teor de cinzas foi obtido por incineração a 550 °C, em forno mufla conforme descrito no método 950.48 da AOAC (2011).

O teor de carboidratos foi estimado através da diferença do percentual total da amostra de farelo de trigo com os teores de gordura, proteína, cinzas e umidade obtidos previamente.

4.3 Planejamento dos experimentos

O delineamento experimental adotado foi o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), tendo como variáveis independentes o tempo de extração (minutos) e a concentração de HCl (mol L^{-1}), conforme apresentado na Tabela 1. A

variável dependente foi a concentração de ácido fítico (AF) obtida na solução após a extração. O ponto central do delineamento foi replicado em triplicata, resultando em um total de 11 experimentos. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente utilizando o software Statistica 7.0 (Statsoft), considerando-se significância para $p < 0,05$. O modelo obtido foi expresso conforme a Equação 2:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_{11} \cdot x_1^2 + \beta_{22} \cdot x_2^2 + \beta_{12} \cdot x_1 x_2 + e \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

y = resposta;

x_1, x_2 = variáveis independentes codificadas;

β = coeficientes de regressão estimados pelo modelo;

e = resíduo (erro experimental).

Tabela 1 – Pontos experimentais do delineamento utilizados na extração.

Experimentos	Variáveis codificadas		Variáveis reais	
	X_1 - [H ⁺]	X_2 -t	[H ⁺] (mol L ⁻¹)	t (min)
1	-1,00	-1,00	0,80	5,00
2	-1,00	+1,00	0,80	15,00
3	+1,00	-1,00	2,00	5,00
4	+1,00	+1,00	2,00	15,00
5	-1,41	0,00	0,50	10,00
6	+1,41	0,00	2,24	10,00
7	0,00	-1,41	1,40	3,00
8	0,00	+1,41	1,40	17,00
9	0,00	0,00	1,40	10,00
10	0,00	0,00	1,40	10,00
11	0,00	0,00	1,40	10,00

Fonte: Autoria própria (2025)

4.4 Quantificação de AF pelo reagente de WADE

O AF foi quantificado utilizando o reagente WADE, o qual foi preparado com 0,15 g de cloreto férrico e 1,5 g de ácido sulfossalicílico dissolvidos em 500 mL de água destilada (Park *et al.*, 2006). A solução obtida foi armazenada em frascos de borossilicato protegido da luz com papel alumínio.

Para a construção da curva de calibração, foi preparada uma solução padrão de AF, pesando-se 0,10 g de AF purificado (Sigma-Aldrich), que foi dissolvido em 50 mL de água ultrapura. A partir desta solução, foram realizadas as diluições seriadas, obtendo as diferentes concentrações para gerar a curva padrão. Após, para medições espectrofotométricas, 1,0 mL das soluções padrões diluídos foram misturados a 3,0 mL do reagente WADE, e a absorbância foi determinada a 500 nm.

Para quantificação de AF do farelo de trigo foi adicionado 1,0 g de NaCl em tubos de centrífuga de 15 mL, seguido de 14 mL dos extratos. A mistura foi agitada até completa dissolução do sal e depois mantida a -20 °C por 20 min. Em seguida, as amostras com extrato foram centrifugadas a 6.000 rpm por 20 minutos, e os sobrenadantes coletados foram diluídos 10 vezes para ajuste da curva de calibração. Para análise, 1,0 mL de cada sobrenadante devidamente diluído foi misturado com 3,0 mL do reagente WADE e no comprimento de onda de 500 nm a concentração foi calculada conforme curva de calibração (Kwanyuen *et al.*, 2007). O rendimento de ácido fítico extraído (%) (g de ácido fítico 100g⁻¹ de FT) foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{AF}}{\text{FT}} \cdot 100 \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

AF = massa de ácido fítico extraído (g);

FT = massa de farelo de trigo (bs) empregado na extração (g).

4.5 Extração de AF assistida por ultrassom

Utilizou-se banho de ultrassom Elmasonic P120H (Elma, Alemanha), operando na frequência de 80 kHz e à temperatura de 25 °C. Foram colocados 10,0 g do farelo de trigo em erlenmeyers contendo 200,0 mL de HCl, onde a concentração do ácido e o tempo de extração foram previamente definidos pelo planejamento experimental. Sequencialmente as amostras (extratos) foram centrifugadas a 6.000 RPM por 20 minutos e 15 mL foram separados para posterior quantificação.

Após analisar a superfície de resposta, foram realizados experimentos em triplicata nas melhores condições de extração empregando-se banho ultrassônico, visando obter a validação experimental do modelo proposto.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise centesimal do farelo de trigo

Na Tabela 2 apresenta-se a composição centesimal do farelo de trigo desengordurado utilizado neste estudo.

Tabela 2 – Composição centesimal

Componente Centesimal	Resultado (%)
Umidade	1,17 ± 0,06
Cinzas	4,81 ± 0,01
Lipídeos	2,66 ± 0,14
Proteína bruta	14,04 ± 0,03
Carboidratos	77,33 ± 0,16

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados de composição centesimal do farelo de trigo estão de acordo com a literatura para farelos de trigo, que relata teores de proteína entre 13–18%, de lipídios entre 3–5%, de cinzas entre 3–6% e umidade 8-12% (Babu *et al.*, 2018). A baixa umidade da amostra, inferior aos valores usualmente descritos, é explicada pelo fato de o material analisado ter sido obtido diretamente da indústria já submetido a processos de estabilização térmica, secagem e armazenamento, o que acaba reduzindo o teor de água residual do produto.

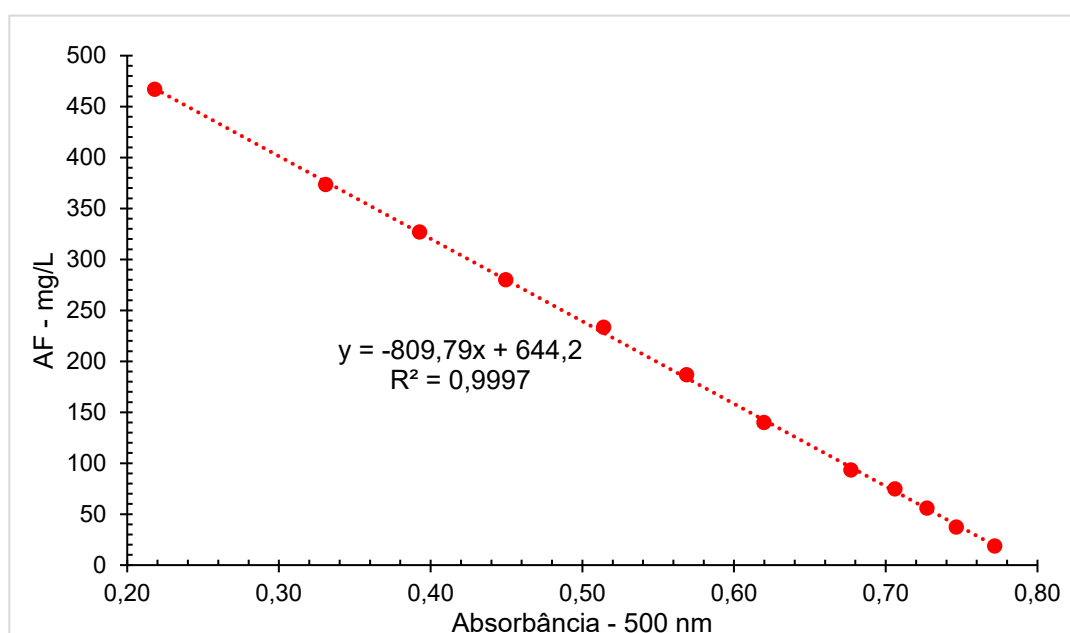
5.2 Extração de ácido fítico do farelo de trigo

A relação entre a concentração dos padrões e a resposta analítica está apresentada na Figura 6, na qual se obteve a curva de calibração obtida para o método. As concentrações utilizadas para gerar essa curva encontram-se na Tabela 3, que serviu de base para o cálculo dos teores de AF nas amostras experimentais por meio da equação ajustada.

Tabela 3 –Absorbância e concentração de AF nas amostras experimentais

Amostras	A	[AF] - mg/L
E1	0,503	2371,46 ± 4,67
E2	0,465	2679,18 ± 4,67
E3	0,434	2930,21 ± 4,67
E4	0,360	3524,06 ± 12,37
E5	0,540	2069,13 ± 14,02
E6	0,455	2757,46 ± 0,00
E7	0,451	2789,85 ± 0,00
E8	0,418	3057,08 ± 8,10
E9	0,381	3356,70 ± 8,10
E10	0,405	3159,65 ± 4,67
E11	0,402	3186,64 ± 8,10

Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 6 - Curva de calibração para quantificação de AF.

Fonte: Autoria própria (2025)

A curva padrão de calibração (FIGURA 6) apresentou elevada linearidade na faixa de concentração analisada, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,997, o que confirma a capacidade preditiva do modelo para a quantificação de AF nas amostras. No método WADE, a relação entre absorbância e concentração de ácido fólico é inversa, uma vez que o AF quelante reage com o íon Fe^{3+} , reduzindo a formação do complexo vermelho característico. Esse comportamento é predito no coeficiente angular negativo observado para a curva (-809,79).

A matriz e os resultados do planejamento experimental encontram-se na Tabela 4, apresentando as concentrações de AF obtidas, expressas em g de ácido fítico 100 g⁻¹ de FT em base seca, e o rendimento de extração.

Tabela 4 – Resultados do planejamento experimental (DCCR) para a extração de AF

Experimentos	Variáveis codificadas		Variáveis reais		y (mg.L ⁻¹)	Rendimento (%)
	X ₁	X ₂	[H ⁺] (mol.L ⁻¹)	t (min)		
1	-1	-1	0,8	05	2371,46 ± 4,67	4,74
2	-1	1	0,8	15	2679,18 ± 4,67	5,36
3	1	-1	2	05	2930,21 ± 4,67	5,86
4	1	1	2	15	3524,06 ± 12,37	7,05
5	-1,41	0	0,5	10	2069,13 ± 14,02	4,14
6	1,41	0	2,24	10	2757,46 ± 0,00	5,51
7	0	-1,41	1,4	03	2789,85 ± 0,00	5,58
8	0	1,41	1,4	17	3057,08 ± 8,10	6,11
9	0	0	1,4	10	3356,70 ± 8,10	6,71
10	0	0	1,4	10	3159,65 ± 4,67	6,32
11	0	0	1,4	10	3186,64 ± 8,10	6,37

Fonte: Autoria própria (2025)

Observa-se que o aumento da concentração de H⁺ promoveu incremento nos teores extraídos de AF, principalmente nas condições superiores e nos pontos centrais do planejamento.

A análise estatística foi realizada no software Statistica 6.0 e permitiu estimar os efeitos das variáveis estudadas no processo (Tabela 5).

Tabela 5 – Coeficientes e significância dos efeitos das variáveis sobre a [AF]

Fatores	Coeficientes	Erro Padrão	t calculado.	p-valor
β ₀ (média)	3234,67	105,4	30,6809	0,0000
β ₁ ([H ⁺])	594,3	129,1	4,6021	0,0058
β ₁₁ ([H ⁺] ²)	-717,8	153,7	-4,6704	0,0055
β ₂ (tempo)	319,9	129,1	2,4775	0,0560
β ₂₂ (tempo ²)	-207,3	153,7	-1,3488	0,2353
β ₁₂ ([H ⁺] tempo)	143,0	182,7	0,7831	0,4690

Fonte: Autoria própria (2025)

Os resultados da regressão indicaram que os termos lineares e a interação entre as variáveis apresentaram efeitos positivos. No entanto, apenas os termos lineares quanto e quadrático associado à concentração de H⁺ foram estatisticamente significativos (p < 0,05), exercendo influência direta sobre a resposta. O tempo de extração apresentou tendência à significância (p=0,056). Ainda que não tenha

atingido o nível de 5%, a literatura destaca que valores de p próximos ao limiar devem ser interpretados com cautela, não como evidências conclusivas, mas como indicativos de possível efeito (Thiese *et al.*, 2016). Desta forma, o modelo final excluiu a interação entre o tempo e a concentração e o modelo que melhor descreveu o rendimento do ácido fítico extraído do FT foi ajustado (Equação 3).

$$y = 3234,67 + 297,12x_1 - 358,90x_1^2 + 159,95x_2 \quad \text{Equação 3}$$

Pela análise de variância (ANOVA) (Tabela 6), verificou-se que os dados experimentais foram bem representados pelo modelo, uma vez que o valor de F calculado foi superior ao F tabelado ($F_{\text{calc}} > F_{\text{tab}}$). Além disso, o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,909$) indica que o modelo explica 90,9% da variabilidade observada na resposta.

Tabela 6. Análise de variância (ANOVA) para a concentração de AF obtida na extração.

	Soma dos quadrados	Grau de Liberdade	Quadrado médio	F-calculado
Regressões	1433630	3	477877	7,4
Resíduos	452512	7	64645	
Total	1886142	10		

% variação explicada (R^2) = 90,9; $F_{3;7;0,05} = 4,35$

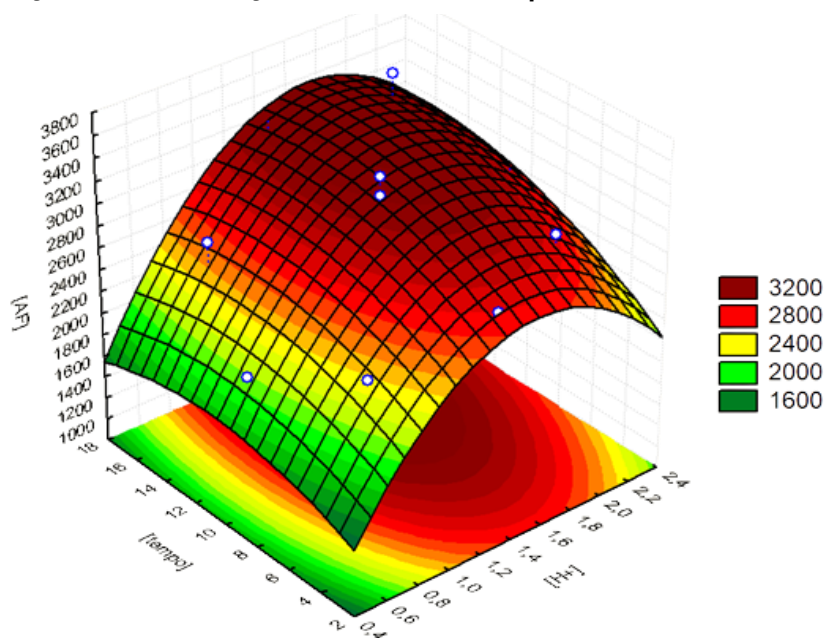
Fonte: Autoria própria

A superfície resposta para o rendimento de ácido fítico obtido na extração está apresentada na Figura 7. Verifica-se que os menores rendimentos ocorreram em condições de concentrações mais baixas do ácido clorídrico. A curvatura observada no delineamento possibilitou identificar ponto de máxima concentração de AF. A partir das curvas de contorno (FIGURA 8), foi possível determinar a região de maior rendimento, correspondente à concentração de H^+ de $1,45 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ e o tempo de extração de 14 minutos.

Foram realizadas três extrações sob as condições ótimas determinadas pelo modelo, com tempo de 14,0 minutos e concentração de H^+ de $1,45 \text{ mol} \cdot L^{-1}$, resultando em uma concentração média de ácido fítico de $3230 \pm 77 \text{ mg} \cdot L^{-1}$, correspondente a 6,5% de rendimento em base seca. Sob essas condições, o rendimento de extração médio foi de 6,5% em base seca, valor também dentro do

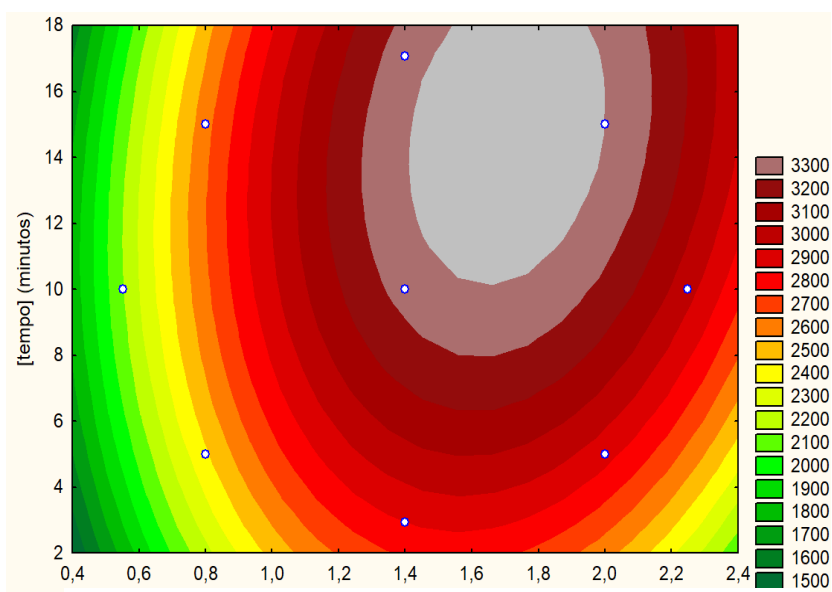
intervalo previsto pelo modelo, confirmando a eficiência do método proposto na solubilização e recuperação do fitato presente no farelo de trigo.

Figura 7 – Superfície de resposta para a concentração de ácido fítico extraído em função da concentração do solvente e tempo de ultrassom



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 8 – Superfície de contorno para a concentração de ácido fítico extraído em função da concentração do solvente e tempo de ultrassom



Fonte: Autoria própria (2025)

A concentração de ácido fítico extraído do FT determinada neste estudo encontra-se acima dos valores médios descritos na literatura, comprovando a efetividade do processo de extração otimizado. Em comparação, extrações realizadas envolvendo e comparando diferentes solventes, como H_2SO_4 , TCA, CH_3COOH e HCl, resultaram em rendimentos variando entre 2,93 e 5,06% (Camire, 1982). Em procedimentos baseados em troca iônica, com HCl 0,5–1,0 M, os valores obtidos variaram amplamente entre 0,24 e 4,67%, dependendo da matriz e do pré-tratamento aplicado (Harland; Oberlead, 1986).

Empregando HCl $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ associado à ultrassonicação, foram observados teores entre 3,95 e 5,75%, indicando que o uso de energia mecânica potencializa a extração, embora envolva maior complexidade experimental (Lehrfeld, 1989). Ainda, extrações conduzidas com HCl $0,2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ evidenciaram dependência do tamanho das partículas e da fração de moagem, apresentando ampla variação entre 0,6 e 5,4%. Esses resultados corroboram que a eficiência de extração está associada não apenas à força ácida, mas também à morfologia e ao grau de dispersão do farelo, sendo que as frações mais grosseiras tendem a apresentar maior rendimento devido à maior concentração superficial de fitatos (Wu *et al.*, 2010).

Em ensaios que envolveram pH controlado e uso combinado de Na_2CO_3 , formaldeído e HCl, foram relatados rendimentos de extração em torno de 2,9%, relacionados à seletividade do método e à purificação posterior do extrato (Ebrahimian, 2016). Em contrapartida, metodologias recentes utilizando HCl $0,5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ com três horas de agitação apresentaram rendimentos de 3,87%, associados a diferentes intensidades de moagem (Eliasdottir *et al.*, 2025).

A Tabela 7 apresenta a comparação entre os principais estudos encontrados na literatura, evidenciando as diferenças metodológicas e de rendimento associadas às condições de extração e quantificação.

Tabela 7 – Métodos de extração e determinação de ácido fítico em farelo de trigo reportados na literatura

Autor / Ano	Matriz estudada	Método de extração	Método de determinação	Faixa (mg·g⁻¹)
Camire (1982)	Farelo de trigo, cereais e leguminosas	3% H ₂ SO ₄ , 3% TCA, 1% TCA, 3% CH ₃ COOH, 1% HCl, 1 M NH ₄ -acetato	Quantificação direta por HPLC	29,34–50,59 (2,93%–5,06%)
Harland e Oberleas (1986)	Farinha e farelo de trigo; outros cereais	HCl 0,5–1,0 M	Troca iônica (adaptado de Wheeler e Ferrel, 1971)	2,38–46,70 (0,24%–4,67%)
Lehrfeld (1989)	Farelo de trigo e outros cereais	HCl 0,5 mol·L ⁻¹ + ultrassom	HPLC	39,5–55,7 (3,95%–5,75%)
Wu <i>et al.</i> (2010)	Farelo de trigo	HCl 0,2 mol·L ⁻¹	Haug e Lantzsch (1983)	6,81–54,0 (0,68%–5,4%)
Ebrahimian (2016)	Farelo de trigo	pH controlado, Na ₂ CO ₃ , formaldeído e HCl	Latta e Eskin (1980)	29,0 (2,9%)
Eliasdottir <i>et al.</i> (2025)	Farelo de trigo	HCl 0,5 mol·L ⁻¹ + 3 h de agitação	Carlsson <i>et al.</i> (2001)	38,71 (3,87%)

Fonte: Autoria própria (2025)

Em suma, a concentração média de ácido fítico de 3230±77 mg. L⁻¹, equivalente a 6,5% de rendimento em base seca, alcançada por meio da otimização de extração, corrobora que a metodologia estabelecida oferece um processo eficiente, rápido e de alta extração.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusão

A extração do ácido fítico a partir do farelo de trigo mostrou-se eficiente e reprodutível, com rendimento de 6,5%, valor superior aos reportados na literatura para essa matriz. O modelo matemático empregado foi capaz de prever o comportamento da extração, demonstrando adequação estatística e coerência com os valores experimentais observados. Entre as variáveis estudadas, a concentração de ácido clorídrico (solvente) apresentou efeito significativamente positivo sobre o rendimento, confirmando o papel determinante da força ácida na solubilização do fitato.

O uso combinado de ácido clorídrico em elevada concentração e ultrassonicação intensificou a liberação do ácido fítico da estrutura lignocelulósica do farelo, evidenciando o potencial do uso de tecnologias assistidas por energia mecânica em processos de extração, tornando possível a otimização de metodologias para obtenção de compostos bioativos a partir de subprodutos agrícolas, agregando valor à cadeia de processamento de grãos.

6.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Otimizar variáveis como granulometria do farelo e a relação sólido-líquido (S/L), para avaliar seus efeitos na difusão e eficiência da extração;
- Investigar diferentes métodos de determinação do ácido fítico;
- Quantificar o fósforo do farelo de trigo utilizando métodos de química instrumental, correlacionando com teor de ácido fítico extraído;
- Realizar análises centesimais do extrato obtido, visando caracterizar sua composição química e possíveis interações entre o AF e outros constituintes;
- Aplicar AF em formulações alimentícias como componente funcional;

REFERÊNCIAS

- ABITRIGO (Associação Brasileira da Indústria do Trigo). Pesquisa de Moagem 2024. São Paulo: ABITRIGO, 2025. Apresentação em formato PDF. Disponível em: <https://www.abitrigo.com.br/wp-content/uploads/2025/05/24.162-Relatório-Pesquisa-de-Moagem-ABITRIGO-2024-DIVULGACAO.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2025.
- ALVES, L. et al. O ultrassom no amaciamento de carnes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, p. 1522-1528, ago. 2013.
- BLOOT, A. P. M. **Extração, purificação e aplicação do ácido fítico do farelo de arroz**. Dissertação de mestrado em Tecnologia de Alimentos, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- CANAN, C. et al. Studies on the extraction and purification of phytic acid from rice bran. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 24, n. 7, p. 1057–1063, 2011.
- CAMIRE, A. L.; CLYDESDALE, F.M. Analysis of phytic acid in food by HPLC. **Journal of Food Science**, v. 47, p. 574-577, 1982.
- CÁRCEL, J. A. et al. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, Valencia, v. 110, n. 2, p. 200–207, jun. 2011.
- CARLSSON, N.-G. et al. Rapid Analysis of Inositol Phosphates. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 49, n. 4, p. 1695–1701, abr. 2001.
- CARNEIRO, J. M. T. et al. Spectrophotometric determination of phytic acid in plant extracts using a multi-pumping flow system. **Analytica Chimica Acta**, v. 474, p. 161–166, 2002.
- CHAMPAGNE, E. T. et al. Solubility behaviors of the minerals, proteins and phytic acid in rice bran with time, temperature, and pH. **Cereal Chemistry**, v. 62, n. 3, p. 218–222, 1985.
- CHEMAT, F.; ZILL-E-HUMA; KHAN, M. K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 18, n. 4, p. 813–35, 2011.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: quarto levantamento, safra 2023/24. Brasília: CONAB, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola>. Acesso em: 2 nov. 2024.
- COSTELLO, A. J.; GLONEK, T.; MYERS, T. C. Nuclear magnetic resonance-pH titrations of myo-inositol hexaphosphate. **Carbohydrate Research**, v. 46, p. 159–171, 1976.
- EBRAHIMIAN, M.; MOTAMEDI, H. Utilization of wheat bran as a source for phytic acid production. **Journal of Pharmaceutical Research**, v. 23, p. 2436–2439, 2016.

ELIASDOTTIR, H. G. et al. Targeting aleurone cells for enhanced protein recovery from wheat bran: Impact on protein functionality and phytate content. **Journal of Cereal Science**, v. 124, p.104205, 2025

ELLIS, R.; MORRIS, R. Appropriate resin selection for rapid phytate analysis by ionexchange chromatography. **Cereal Chemistry**, v. 63, n. 1, p. 58–59, 1986

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Agricultural production statistics 2010–2023. **FAOSTAT Analytical Briefs**, n. 96. Roma: FAO, 2024. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3755en>. Acesso em: 6 jun. 2025.

FERGUSON, E. L. et al. Phytate, zinc, and calcium contents of 30 East African foods and their calculated phytate:Zn, Ca:phytate, and [Ca][phytate]/[Zn] molar ratios. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 1, p. 316–325, 1988.

FILGUEIRAS, C. T. **Purificação de ácido fítico de germe de milho e avaliação da propriedade antioxidante**. [s.l.]: Londrina State University, 2009.

FONTAINE, T. D.; PONS, W. A.; IRVING JR., G. W. Protein-phytic relationship in 42 peanuts and cottonseed. **Journal of Biological Chemistry**, v. 164, p. 487–507, 1946.

FROSSARD, E. et al. Potential for increasing the content and bioavailability of Fe, Zn and Ca in plants for human nutrition. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 80, p. 861–879, 2000.

FUH, W. S.; CHIANG, B.-H. Dephytinisation of rice bran and manufacturing a new food ingredient. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 15, p. 1419–1425, 2001.

GRAF, E.; EMPSON, K. L.; EATON, J. W. Phytic acid: a natural antioxidant. **The Journal of Biological Chemistry**, v. 262, n. 24, p. 11647–11650, 1987.

GRAF, E.; EATON, J. W. Antioxidant functions of phytic acid. **Free Radical Biology & Medicine**, v. 8, p. 61–69, 1990.

HARLAND, B. F.; OBERLEAS, D. Anion-exchange method for determination of phytate in foods—collaborative study. **Journal of the Association of Official Analytical Chemists**, v. 69, p. 667–670, 1986.

HONG, R; HUIJIE, L, T, W. Optimization of extraction condition for phytic acid from peanut meal by responce surface methodology. **Resource-Efficient Technologies**. v. 03, p. 226-231, 2017.

HUANG, J. et al. Enhanced stability and oxidation resistance of Acer truncatum Bunge seed oil Pickering emulsion using rice bran protein modified by phytic acid. **Food Chemistry: X**, v. 25, p. 102080, 2025.

JI. W. et al. Phytic acid-stabilized super-amphiphilic Fe₃O₄-graphene oxide for extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from vegetable oils. **Food Chemistry** v. 7, n. 12, p. 104–110, 2017.

- KASIM, A. B.; EDWARDS, H. M. The analysis for and effect of phytate on corn and soybean meal. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 46, n. 10, p. 4316–4320, 1998.
- KIM, S. M. et al. Modulatory effect of rice bran and phytic acid on glucose metabolism in high fat-fed C57BL/6N mice. **Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition**, v. 42, p. 12–17, 2010.
- KNORR, D. et al. Emerging technologies in food processing. **Annual Review of Food Science and Technology**, v. 2, p. 203–235, 2011.
- LATTA, M.; ESKIN, M. A simple and rapid colorimetric method for phytate determination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 28, p. 1313–1315, 1980.
- LAZARTE, C. E. et al. Phytate, zinc, iron and calcium content of common Bolivian food, and implications for mineral bioavailability. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 39, p. 111–119, 2015.
- LEE, S.-H. et al. Dietary phytic acid lowers the blood glucose level in diabetic KK mice. **Nutrition Research**, v. 26, n. 9, p. 474–479, 2006.
- LEHRFELD, J. High-performance liquid chromatography analysis of phytic acid on a pH-stable, macroporous polymer column. **Cereal Chemistry**, v. 66, p. 510–515, 1989.
- LI, Y. et al. Boosted performance of thin-film nanocomposite membranes based on phytic acid functionalized Zr-MOF for nanofiltration. **Desalination**, v. 594, p. 118278, 2025.
- MAKOWER, R. U. Extraction and determination of phytic acid in beans (*Phaseolus vulgaris*). **Cereal Chemistry**, v. 47, p. 288–295, 1970.
- NAPPI, G. U. et al. Validação de métodos para determinação dos ácidos fítico e oxálico em multimistura. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 4, p. 811–820, dez. 2006.
- NEMES, M. et al. Application of ultrasound in wheat bran extraction for the recovery of sugars, phenolics and organic acids. **Food Chemistry**, v. 450, p. 1–10, 2025.
- PATIST, A.; BATES, D. Ultrasonic innovations in the food industry: From the laboratory to commercial production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 9, n. 2, p. 147–154, 2008.
- PHILLIPPY, B. Q.; BLAND, J. M.; EVENS, T. J. Ion chromatography of phytate in roots and tubers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 2, p. 350–353, 15 jan. 2003.
- QUIRRENBACH, H. R.; KANUMFRE, F.; ROSSO, N. D.; CARVALHO FILHO, M. A. Comportamento do ácido fítico na presença de Fe(II) e Fe(III). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 1, p. 26–34, 2009.
- SAAD, N. et al. Optimization of optimum condition for phytic acid extraction from rice bran. **African Journal of Plant Science**, v. 5, n. 3, p. 168–175, 2011.

SHAMSUDDIN, A. M. Anti-cancer function of phytic acid. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 37, n. 7, p. 769–782, 2002.

SOCIEDADE dos Poetas Mortos. Direção: Peter Weir. Roteiro: Tom Schulman. Produção: Paul Junger Witt, Steven Haft e Tony Thomas. EUA: **Touchstone Pictures**, 1989. 1 DVD

SORÍA, A. C.; VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, n. 7, p. 323–331, 2010.

THIESE, M. S.; RONNA, B.; OTT, U. P value interpretations and considerations. *Journal of Thoracic Disease*, v. 8, n. 9, p. E928–E931, 2016.

VINATORU, M. An overview of the ultrasonically assisted extraction of bioactive principles from herbs. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 8, n. 3, p. 303–313, 2001.

VUCENIK, I. et al. Antitumor activity of phytic acid (inositol hexaphosphate) in murine transplanted and metastatic fibrosarcoma, a pilot study. *Cancer Letters*, v. 65, p. 9–13, 1992.

WANG, P.; LI, Y.; LIU, X. Extraction, isolation, purification, and detection techniques for phytic acid and their applications in various fields: A systematic review. *Food Chemistry*, v. 486, p. 144567, 2025.

WU, Peng.; ZHAO, Tao.; TIAN, Ji-chun. Phytic acid contents of wheat flours from different mill streams. *Agricultural Sciences in China*, v. 9, p. 1684-1866, 2010.

XU, X. et al. Effects of phytic acid from soybean meal on Maillard reaction and antioxidant properties of products. *Food Chemistry*, v. 463, p. 141257, 2025.